

課題名	S-3 脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案手法の確立に関する総合研究プロジェクト 3. 都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減策導入効果の評価
課題代表者名	花木啓祐 (東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻)
<p>研究体制</p> <p>(1)都市シナリオの設定と二酸化炭素削減量統合評価 (東京大学) (2)都市エネルギー供給由来の二酸化炭素排出評価と変革による削減効果 (東京大学) (3)都市建築物由来のエネルギー消費と変革による削減効果 (慶應義塾大学) (4)都市への燃料電池と太陽電池導入によるエネルギー削減効果 (信州大学) (5)都市圏におけるモビリティ由来のエネルギー消費と変革による削減効果 (東京大学) (6)都市系バイオマスと未利用エネルギーの活用によるエネルギー削減効果 (東京大学) (7)都市における自動車の改善による二酸化炭素削減効果 (東京大学) (8)地域冷暖房とコジェネの導入による削減効果 (東京理科大学) (9)さまざまな主体の知識共有のための統合ツール開発 (東京大学)</p>	
<p>研究概要</p> <p>1. 序</p> <p>わが国の二酸化炭素排出量の動向を見ると、交通、業務、家庭部門の伸びが著しく、これらの部門への対策がわが国の二酸化炭素排出量削減の成否を握っている側面が非常に大きい。これらの二酸化炭素排出のほとんどは都市の場において生じているものであり、それは都市活動や都市構造と深い関係がある。二酸化炭素削減対策としては、エネルギー消費量の削減を図る技術、再生可能エネルギーを始めとして供給エネルギーの炭素強度を下げる技術があり、その開発が進んでいる。しかし、これらの技術による二酸化炭素の削減可能量の推定に当たっては、技術のみを取り出して行う評価ではまったく不十分であり、実際に都市に導入された状況を想定して推定を行うことが必要である。とりわけ、複数の対策が同時に導入される場合には、対策相互の相殺効果、電力需要変化に伴う系統電力の炭素強度の変化など、複雑な問題が存在しており、これらを考慮せずに技術評価を行うと対策効果の過大評価につながる。本研究は、対策技術適用の場であり、また将来の社会的な変化が端的に現れる都市を対象にした対策効果の解析を行う。</p> <p>16、17年度は、日本全体の将来の二酸化炭素排出と対策効果を見積もることを最終目的として、タイプの異なる5つの都市を選定し、地理情報システムの活用による解析の可能性を検討した。18年度はそれらの成果に基づきつつ、シナリオチームから提供される将来社会の2つのビジョンに基づいて、2050年までの日本全体の二酸化炭素排出量の予測とその削減可能量を統合的なツールを用いて算出した。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究では都市に対して取られるさまざまな対策間の相互関係を考慮した統合解析を現実の都市の場に対して適用することによって、都市単位での実際の削減可能量を推定することを目的とする。気候条件、人口規模、都市活動の内容が異なるわが国の複数の都市を対象にして、技術開発の動向を織り込んだ2020年までの削減可能量と、2050年での削減可能量を、複数の社会経済的なストーリーラインシナリオ毎に算出し、またそれらの実現に当たっての都市側の主体間の協力の必要性を示すことを最終目的とする。とりわけ、2050年に対しては削減目標を設定し、その実現のために必要な都市における対策とその組み合わせを明らかにすることを目標とする。今後人口減少が開始するわが国にあって、それぞれの都市の活動度がどのように変化するかは温室効果ガスの排出量を大きく左右する要因であるが、また確実な予測を行うことは困難であり、将来のシナリオを設定して温室効果ガスの排出量予測と対策の効果を評価していくことが必要である。本研究では、実際の都市におけるそれぞれの対策の間に相互関連があることを重視し、各分担サブテーマ間の整合性、相互関連を重視して研究を行う。</p>	

3. 研究の方法と結果

(1)都市シナリオの設定と二酸化炭素削減量統合評価（東京大学）

超長期脱温暖化社会シナリオA・シナリオBに沿って都市将来シナリオを設定し、技術導入による二酸化炭素削減の全国推計を試みた。具体的には、各都道府県の都市部、平野農村部、中山間部における有機性食品廃棄物および下水汚泥の排出量と利用可能量を2050年まで推定し、バイオガス回収・利用技術導入の持つポテンシャルを推定した。これによって過去における都市街区レベルの比較的詳細な空間分析から、将来シナリオをベースとした全国推計まで一貫した分析を行い、将来シナリオにおける全国二酸化炭素削減統合評価へ向け、重要な知見を得た。

図1に示すように、全国における将来超長期社会シナリオ別の年間発電量は、2050年において、社会シナリオA・B共通で約3400GWh/年であった。これらのエネルギー回収量は各シナリオにおいて地域差が存在するものの、2005年時点における電力およびガス供給を代替すると仮定した場合、二酸化炭素換算で年間約184万トン-CO₂を削減できることが明らかとなった。

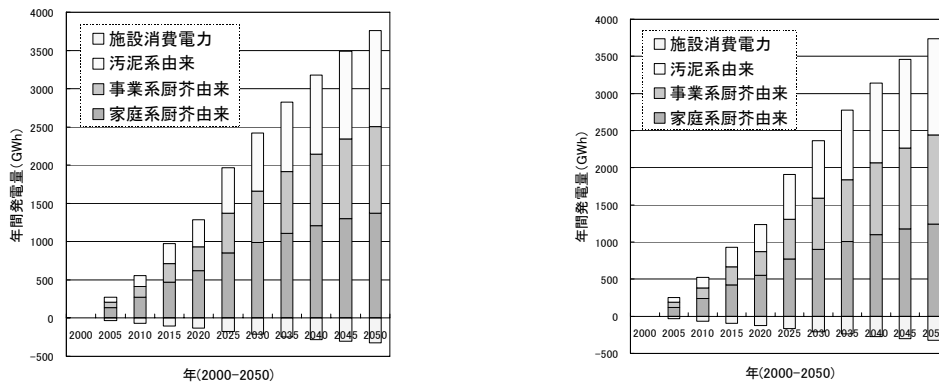


図1. 社会シナリオA（左）およびB（右）における推定バイオガス年間発電量（全国）

(2)都市エネルギー供給由来の二酸化炭素排出評価と変革による削減効果（東京大学）

16年度は、日本全国を9地域に分割した最適電源構成モデルを構築した。本モデルの時間解像度は、7季節、24時間帯であり、各種電源を考慮し、CO₂回収貯留設備も考慮した。17年度は、個々の家庭における不確実な需要を生成するモデルを構築した。18年度は、上記の家庭用のエネルギーモデルに関して貯湯タンク内残湯量に関する終端効果の影響を回避できるように改善し、ガスエンジンCGSに加えて、燃料電池CGSモデルも構築してCO₂排出削減量の評価を行った。

図2には冬季平日の全国の家部門（戸建）の電力日負荷曲線の推計例を示す。「電力負荷」は、CGSとHPがないときの電力負荷であり、「GE」はガスエンジンCGS、「FC」は燃料電池CGS、「HP」は給湯用ヒートポンプがそれぞれ、戸建住宅に100%普及した場合の購入電力の日負荷曲線の推計値である。このようにして求められたCGSやHPの導入に伴う電力や燃料（都市ガス）の全国規模での購入量の変化から、電力のCO₂原単位を横軸として、各機器を導入したケースでのCO₂排出量のベースケース（CGSもHPも導入しないケース）からの変化を計算した結果を図3に示す。

図3に示すように、想定する系統電力のCO₂原単位によって、CGSやHPの導入によるCO₂排出削減量は、約±20Mt/年で変化する。CGSとHPの効果は逆転する境目は系統電力のCO₂原単位の値が500～550g/kWhとなる。系統電力のCO₂原単位の値が500～550g/kWhの場合、CGSとHPの優劣は判断しにくく、CGSもHPも導入されない場合からの削減効果は、日本全国の戸建住宅への100%導入を想定すると、いずれの場合でも年間500万トン程度と推定される。

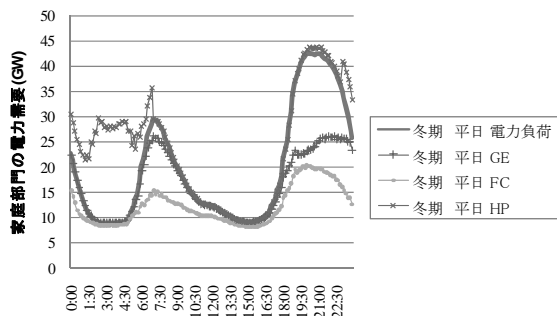


図2. 家庭部門（戸建）の電力日負荷曲線の例

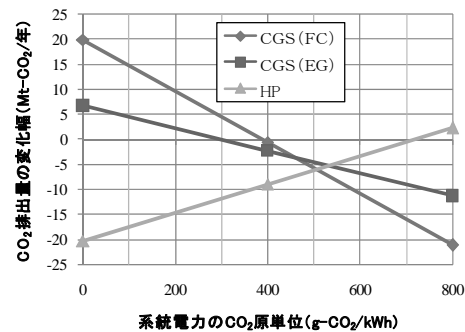


図3. 家庭部門（戸建）のCO₂排出量の変化と系統電力のCO₂排出原単位

(3) 都市建築物由来のエネルギー消費と変革による削減効果 (慶應義塾大学)

16、17年度は住宅におけるエネルギー消費とその削減がもたらす効果を対象都市に対して検討し、地域ごとの人口の動向がもたらす効果を検討した。

18年度は事務所ビルを対象とし、その運用時、新築時、改修時のCO₂排出量を都道府県別に2050年まで予測した。表1に示すように、未来社会像として、シナリオA(都市集中型社会)、シナリオB(地方分散型社会)、シナリオM(シナリオAとBの中間)を設定し、電力部門の対策として、電力のCO₂原単位が2005年以降変化しないシナリオ1と経済産業省の超長期エネルギービジョンに基づくシナリオ2を想定した。

M1シナリオの予測結果を表1に示す。2050年におけるCO₂排出量は1990年に比べて、自然体ケースでは42%削減され、対策ケースでは52%削減できる。また、M2シナリオでは、表1に示すように、自然体ケースでは68%削減され、対策ケースでは78%削減できることがわかった。

表1 検討シナリオと事務所ビルの運用・新築・改修時のCO₂排出量削減率

No.		未来社会シナリオ		電力部門シナリオとCO ₂ 原単位(kg-CO ₂ /kWh)			CO ₂ 排出量削減率(1990年=100%)			
				1990年	2020年	2050年	自然体ケース		建築対策ケース	
							2020年	2050年	2020年	2050年
A1	Aシナリオ	1	2005年以降固定	0.421	0.390	0.390	-12%	-34%	-12%	-46%
A2		2	超長期ビジョン	0.421	0.315	0.120	-26%	-63%	-26%	-64%
B1	Bシナリオ	1	2005年以降固定	0.421	0.390	0.390	-23%	-50%	-23%	-69%
B2		2	超長期ビジョン	0.421	0.315	0.120	-36%	-72%	-35%	-81%
M1	Mシナリオ	1	2005年以降固定	0.421	0.390	0.390	-18%	-42%	-18%	-52%
M2		2	超長期ビジョン	0.421	0.315	0.120	-31%	-68%	-31%	-78%

(4) 都市への燃料電池と太陽電池導入によるエネルギー削減効果 (信州大学)

都市への太陽光発電の導入可能性を明らかにし、中長期的な導入シナリオを描き、太陽光発電導入によるCO₂削減効果を予測した。NEDOの導入目標に基づき、日本全国での太陽光発電の導入量を2050年まで予測した(図4)。2050年の太陽光発電による発電シェアは40%まで増加し、住宅の屋根のみに設置した場合、日本全国の屋根面積の約60%が太陽電池で覆われると予測された。その規模までの大量太陽光発電の導入は電源構成の大幅な変更を余儀なくすることが示唆された。

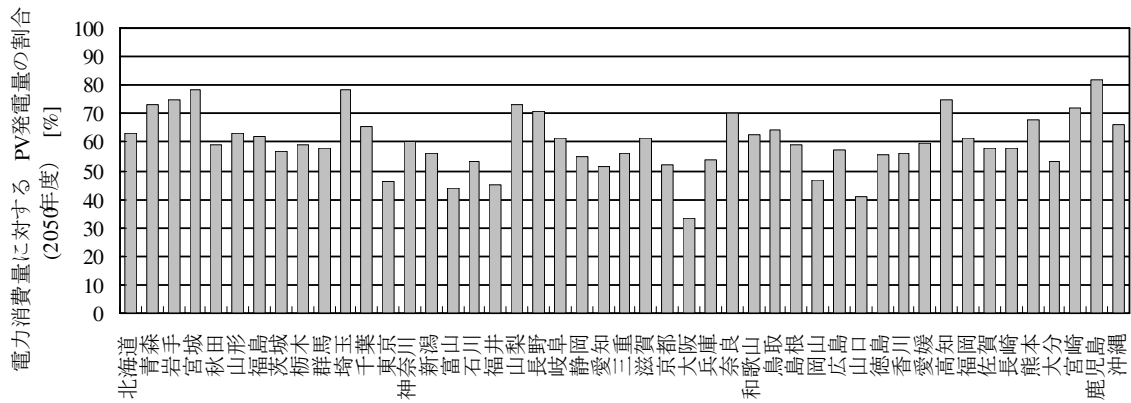


図4 都道府県別の電力消費量(2004年度)に対する太陽光発電量(2050年度予測値)の割合

太陽光発電の大規模導入を可能にする手段として蓄電池の併用に注目し、蓄電池を併設した、「完全独立型」と「系統連系逆流なし」の二つのシステムについて発電コスト、CO₂排出原単位を評価した。「完全独立型」は、蓄電池製造コストが現状の約10分の1まで低下したとしても、発電コストは現在の系統電力の数倍程度にしか低減できない。一方、「系統連系逆流なし」では、太陽電池容量と蓄電池容量の間に最適な組み合わせがあり、蓄電池コストが現状の10分の1程度まで低下すれば、系統電力に匹敵する発電コストになり、太陽光発電量も有効に利用され、太陽光発電の大規模導入を可能にする有望なシステムであることが示された。

(5) 都市圏におけるモビリティ由来のエネルギー消費と変革による削減効果 (東京大学)

本サブテーマは、都市圏内の交通機関(主に自動車)を対象とする。

16・17年度に行った内容は次の2つである。第一に、エリア課金方式のロードプライシング政策の評価を行えるネットワーク均衡モデルを提案し、これを沖縄本島に適用した。第二に、ネットワーク分析手法を用いて混雑現象を考慮しながら職住最適再配置政策を評価できるモデルを提案し、これを3つの都市圏に適用し、通勤目的の自動車からのCO₂排出量の削減効果を定量的に示した。18年度は、平成11年道路交通センサスのオーナーインタビューOD調査データを用いて、徒歩や自転車への転換が可能と考えられる比較的短距離の自動車トリップがどの程度存在しているかを、土地利用類型別・目的別に集計した。トリップチェーンにおける①合計移動距離が10km以下であり、全トリップについて②区間距離が5km以下、③乗車人員が1人、④目的が「送迎」や「荷物の運搬を伴う業務」でない—の4条件を満たすトリップを、徒歩や自転車に転換可能とみなして抽出した。仮に手段転換が完全に行われれば、全国・全目的で約5%のCO₂排出量が削減されることを示した(表2)。さらに、全体プロジェクトで設定されている2つのシナリオに即し、職住最適再配置と短距離自動車トリップの削減を積み重ねた場合のCO₂排出量削減ポテンシャルを試算した。

表2 短距離自動車トリップの削減によるCO₂排出量の削減ポテンシャル(削減率)

	都市地域	平野農業地域	中山間地域
三大都市圏	-4.9%	-4.3%	-3.5%
地方中枢都市圏	-4.5%	-3.9%	-4.7%
地方中核都市	-5.6%	—	—
その他地域	-6.1%	-4.6%	-4.2%

※全国平均：
-4.9%

(6) 都市系バイオマスと未利用エネルギーの活用によるエネルギー削減効果(東京大学)

17年度までに、横浜市を対象とした都市湿系廃棄物(厨芥、下水汚泥)からのメタンガス製造ポテンシャルとそれに伴うライフサイクルでの二酸化炭素排出削減量の推定を詳細に行うとともに、東京都区部を対象として下水流下モデルと地域冷暖房プラントモデルを組み合わせた下水熱利用地域冷暖房導入ポテンシャルの評価モデルを構築した。本年度は、建設発生木材、栽培系バイオマスによるバイオエタノール製造ポテンシャルを推定するとともに、下水熱利用の地域冷暖房システムによる二酸化炭素排出削減ポテンシャルの推定を行った。

建設発生木材からのバイオエタノール製造ポテンシャルを2050年の超長期シナリオに基づき予測した結果、日本全国で2050年時点においてシナリオAで3.0百万kL(62.8PJ)、シナリオBで3.1百万kL(66.7PJ)であり、発熱量換算で2002年時点のガソリン消費量の約3%に相当する。つまり、2050年に全てのガソリンがE3と代替可能となるようなエタノールを供給できるという試算となった。エネルギー作物や早生樹などの栽培系バイオマスのポテンシャルについては、年間約4300PJ(早生樹87%、エネルギー作物13%)と推定され(図5)、建設発生木材と比べて大きな値となった。

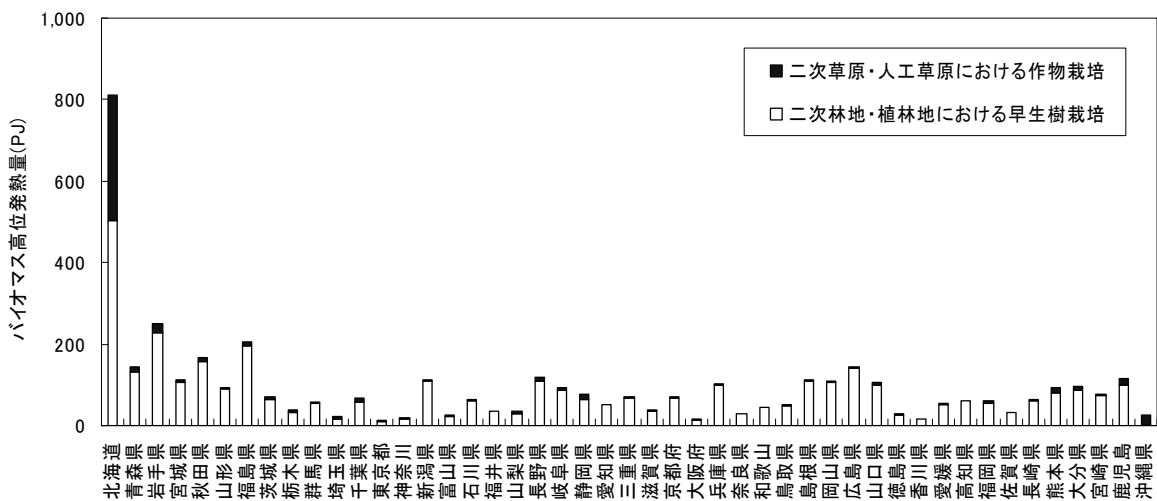


図5 栽培系バイオマス都道府県別生産ポテンシャル推定結果

下水熱利用地域冷暖房のポテンシャルについては、都区部全体では320の地区に導入することにより約137[千ton/yr]の二酸化炭素削減ポテンシャルがあることが分かった。これは、東京都区部の民生部門の二酸化炭素排出量の推定値の0.54%であった。下水熱利用地域冷暖房の導入は寒冷地の方が

削減コストや削減率といった面で効果が大きくなるが、熱利用による冬季の下水温度の低下が問題となり多数のDHCの導入には困難があることが示された。

(7)都市における自動車の改善による二酸化炭素排出量変化（東京大学）

本研究では平成18年度までに構築した物流の波及に注目した地域間の物流量の新しい計算手法を利用して、2050年における人口シナリオを考慮したモーダルシフト等のCO₂排出削減ポテンシャルの分析に適用する。まず最終需要により発生する誘導物流の全国への波及に注目した計算手法を計算機上に実装し、算出した誘導物流により生じるCO₂排出量を計算した。またその計算結果を利用して、人口シナリオを考慮した2050年におけるCO₂排出量削減ポテンシャルを求めた。

東京都と北海道を例にとって示し、最終消費地域によって発生する物流が異なることを示した。またモーダルシフトと人口変動の観点からみたCO₂の削減ポテンシャルを推計した。人口シナリオによって与えられる人口変動を最終需要の変動として捉え、誘導物流の変化を求め、それによって変化するCO₂排出量を計算（図6）。1人あたりのCO₂排出量は、現状（2000年）を9.56kg・CO₂/人として、シナリオAで9.51 kg・CO₂/人、シナリオBで9.46 kg・CO₂/人となり、人口比例で最終需要を与えていても人口シナリオの地域差によって、1人あたりの排出量はシナリオ別に若干異なる。

次に、シナリオAで求めた2050年のCO₂排出量からモーダルシフトを行った場合のCO₂削減は、農水産品以外の品類でモーダルシフトを40%達成すると、現在の排出量の約30%の削減を見込むことができる。シナリオBでモーダルシフトを行った場合には、農水産品以外の品類で40%のモーダルシフトを行うと、現在の排出量の約26%の削減を見込むことができる。

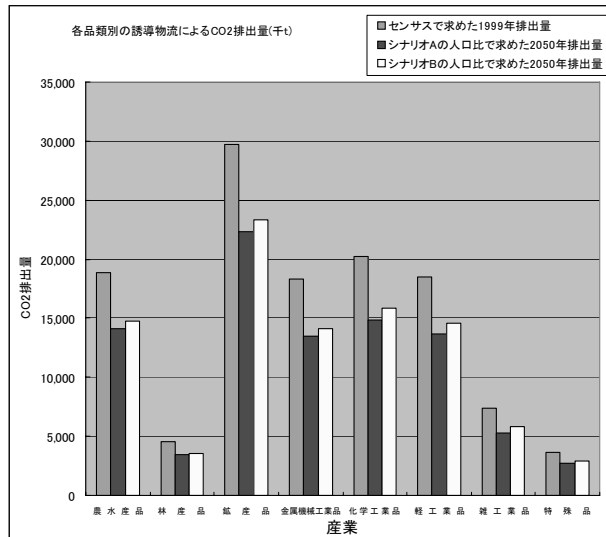


図6 人口シナリオ別の最終需要品別CO₂排出量(単位: 千t・CO₂)

(8)地域冷暖房とコジェネの導入による削減効果（東京理科大学）

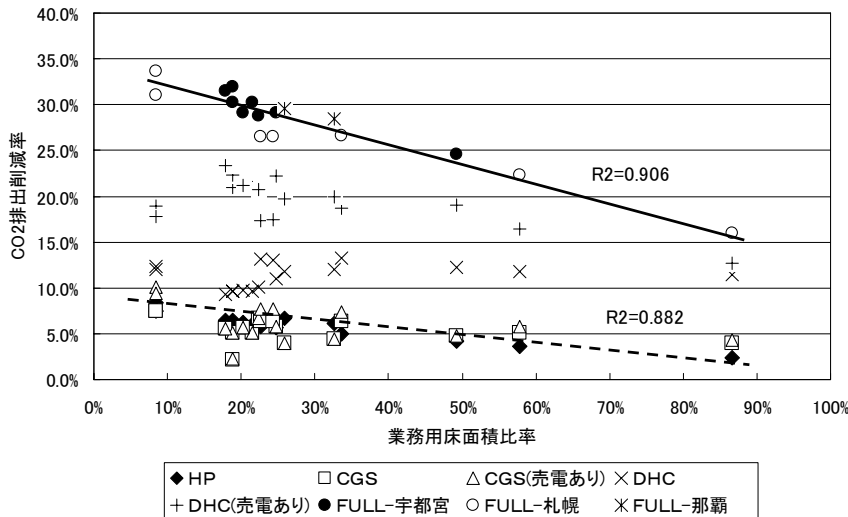


図7 札幌、那覇、宇都宮における業務用床面積比率とCO₂排出削減ポテンシャルの関係

コージェネレーションシステム(以下CGS)、ヒートポンプ(HP)、さらに地域冷暖房(DHC)としての導入など、エネルギーネットワークの導入効果が期待されている。しかしこれらの機器は異なる特性を持ち、効果は導入対象のエネルギー需要に依存する。本研究では、GISを用い地域の詳細な建物データに基づいてエネルギー需要を推計するとともに、分散エネルギーネットワークの最適導入を混合整数非線形計画法でモデル化し、最適な導入規模とCO₂排出削減ポテンシャルの評価を行った。

平成17年度は、宇都宮市の7行政区画を取り上げてGISに基づき都市街区における業務建物群と住宅群面積を抽出し、CGS、PV、HP、DHCを導入した場合の潜在的CO₂削減効果を評価した。

平成18年度はさらにこの結果を日本全体のCO₂排出削減ポテンシャル導入効果評価に敷衍するため、札幌、那覇の気候や人口など特性の異なる複数の都市を対象に、同様にGISを用いて行政区画ごとの用途別建物床面積データを抽出し、上記分析方法を適用した。異なる地域を対象にすることにより、建物構成の違いや、気候の違いによる分散型電源の有効性の比較が可能となる。この結果、図7のようにHP導入時及び全オプション導入時の場合、札幌、那覇、宇都宮の3地域に共通する業務用床面積比率とCO₂排出削減率の関係を見出すことができた。この関係を日本の各都市に適用することで、都市部の潜在的CO₂排出削減率が推定できると考えられる。

そこで、日本の950主要都市について、宇都宮市のデータをもとに中心からの距離と業務用床面積比率の関係を推計し、Case-FU11について潜在的CO₂排出削減率を推計した。この結果、日本の950都市全体では、約18.6%のCO₂排出削減ポテンシャルがあることが示された。

(9)さまざまな主体の知識共有のための統合ツール開発 (東京大学)

それぞれの研究者間に遍在する知識を、インターネットの利用により、知識協調を行い、プロジェクトの目標達成を支援する「ウェブ・ベース協調基盤」の設計と構築を行った。16年度の研究者間の知識共有情報基盤の構築に続き、17年度は、内外の研究者により構築されている数値モデルをウェブ・ベース基盤において外部から操作できるインターフェース作成を中心に実施した。具体的にはDOME (distributed object-based modeling environment)のモデル統合基盤を用いて、ウェブ・ベース基盤を通じてアクセスできる環境を構築した。これに続き18年度は、当該プロジェクト内において開発された複数のモデルを連動させるための統合モデルを中心に、電源構成モデルと、電力需要を削減するための住宅・建物省エネルギー対策モデルの統合を図8のように行い、電力会社別の計算を行い、CO₂排出量を計算することを可能にした。成果をまとめると、①DOME統合機能を用いた電源計画・供給モデルと民生部門モデルとの統合モデルの構築、②電源計画・供給モデルの拡張(9電力会社の計算)及び全国CO₂排出量評価、③9電力会社の計算へ拡張した電源計画・供給モデルと民生部門モデルとの統合解析及び全国CO₂排出量評価、となる。

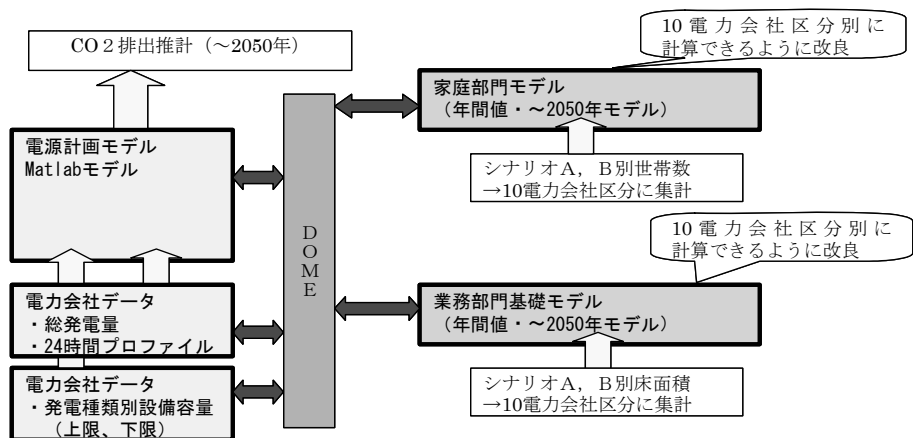


図8. 電源計画モデルと需要部門(民生部門)の統合の概要

4. 考察

16、17年度はモデル都市を対象にした解析を行ってきた。18年度はこれらの緻密な結果に基づき、日本全体の各部門における排出とその削減を推定することに力を注いだ。その際、シナリオグループによって作成されたA、B両ビジョンを適用した点で昨年までの成果を発展させるものとなった。これらの組み合わせによって求められた二酸化炭素削減量は、大幅な削減可能性を示すものであるが、本研究課題全体としては今後さらに考察を加え、不確定性を減じていく必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

従来個別に推定されていたさまざまな需要側の対策と供給側の対策のシミュレーションを、社会のシナリオを想定して行った点に意義がある。とりわけ、電力需要、太陽光発電と発電の電源構成の間の関係をシミュレーションすることによって、将来の電源構成の変化を含む対策効果を評価することを可能にした。

(2) 地球環境政策への貢献

わが国の2050年までの二酸化炭素排出削減可能量を示すための重要な成果を得ることが出来た。電源構成の変化と需要側対策の相互効果については、今後さらに検討する必要があるものの、その手法は今後の対策効果の評価に用いることができる。

6. 研究者略歴

課題代表者：花木啓祐

1952年生まれ、東京大学工学部卒業、工学博士。現在、東京大学大学院工学系研究科教授

主要参画研究者

(1)：花木啓祐(同上)

(2)：藤井 康正

1965年生まれ、東京大学工学部卒業、博士(工学)。横浜国立大学工学部助手、現在、東京大学大学院新領域創成科学研究科助教授

(3)：伊香賀俊治

1959年生まれ、早稲田大学理工学部卒業、博士(工学)、東京大学生産技術研究所助教授、(株)日建設計環境計画室長、現在、慶應義塾大学理工学部教授

(4)：高橋伸英

1971年生まれ、東京大学工学部卒業、工学博士、現在、信州大学繊維学部助手

(5)：原田昇

1955年生まれ、名古屋大学卒業、工学博士。現在、東京大学大学院工学系研究科教授

(6)：荒巻俊也

1968年生まれ、東京大学工学部卒業、博士(工学)。現在、東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻助教授

(7)：吉田好邦

1968年生まれ、東京大学工学部卒業、博士(工学)。現在、東京大学大学院新領域創成科学研究科助教授

(8)：森 俊介

1953年生まれ、東京大学工学部卒業、工学博士。現在、東京理科大学理工学部教授

(9)：スティーヴェン・クレイネス

1969年生まれ、Oberlin College卒業、工学博士。現在、東京大学総括プロジェクト機構助教授

7. 成果発表状況(本研究課題に係る論文発表状況。)

なし